

Research Paper

Efficiency Analysis of Setting Two Unisized Hydrocyclones in Series Network on Wastewater Treatment of Granite and Marble Stone Cutting Industrial Factories

Azam Ahmadi Ghadikolaei¹, Mohsen Masoudian^{2*}, Davood Kalantari³, Omolbani Mohammadrezapour⁴

¹ Ph.D. Candidate, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

² Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

³ Associate Professor, Bio System Mechanic Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

⁴ Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran



10.22125/iwe.2024.454535.1804c

Received:
April 27, 2024
Accepted:
October 7, 2024
Available online:
December 26, 2024

Keywords:
Retreatment, Separation efficiency, Wastewater.

ABSTRACT

Most of stone cutting factories are placed in dry region. The required water of these factories is provided by digging deep wells. To reduce water consumption, often the obtained wastewater is treated in traditional way through sedimentation basins at low efficiency. Recently, the use of hydrocyclones to treat with high efficiency has increased, it is important to know the factors affecting the improvement of treatment efficiency. In this study, the effect of parameters including input flow rate, inlet pressure and retreatment of the overflow on the performance of a 140mm diameter hydrocyclone were investigated. Experiments were designed with the aim of separating granite and marble powder particles using the "Response Surface" method by DESIGN EXPERT. 10 software. A according to the obtained results, by increasing the input flow from 0.7 to 1.3 Li/s and reducing the inlet pressure from 4.1 to 2.1 bar, the separation efficiency of granite and marble in the first stage of treatment, respectively 11.19 and 15.04 %, and in the second stage, 6.84 and 12.23 % has been increased. Also, the retreatment of the overflow from the hydrocyclone increased the total separation efficiency for granite and marble wastewater by 16.24 and 15.16 %, respectively. Due to the high price of water supply in these factories, changing the input flow rate, pressure and the retreatment of the overflow of the first stage of treatment without the need to add a hydrocyclone and other equipments, it is suggested to improve the treatment efficiency.

* **Corresponding Author:** Mohsen Masoudian

Address: Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
Email: Mohsen_masoudian@yahoo.com
Tel: 09112584818

Azam Ahmadi Ghadikolaei, Mohsen Masoudian*, Davood Kalantari, Omolbani Mohammadrezapour

Efficiency Analysis of Setting Two Unisized Hydrocyclones in Series Network on Wastewater Treatment of Granite and Marble Stone Cutting Industrial Factories

1) Introduction

Ozyonar and Karagozoglu (2012) estimated the daily water consumption in stone cutting industrial units in average 50 to 150 m³, and the obtained wastewater contains 2 to 10 % of stone powder particles. The efficiency of stone cutting wastewater treatment with the conventional method of sedimentation basins is low; therefore, recently Naderi et al. (2018b) proposed the use of hydrocyclone as a modern and economic method to treat stone cutting wastewater.

2) Materials and Methods

The material used in this research is granite and marble stone powder. Design Expert.10 software was used for initial design of experiments using response surface method (RSM). So that the separation efficiency parameter in the first stage of wastewater (Ef1), in the retreatment stage (Ef2) and in the total state (Eft) as the response and parameters of the input flow (sum of overflow and underflow) (Qo) in ls-1 and inlet pressure (Pi) in bar, were considered as variables.

3) Results

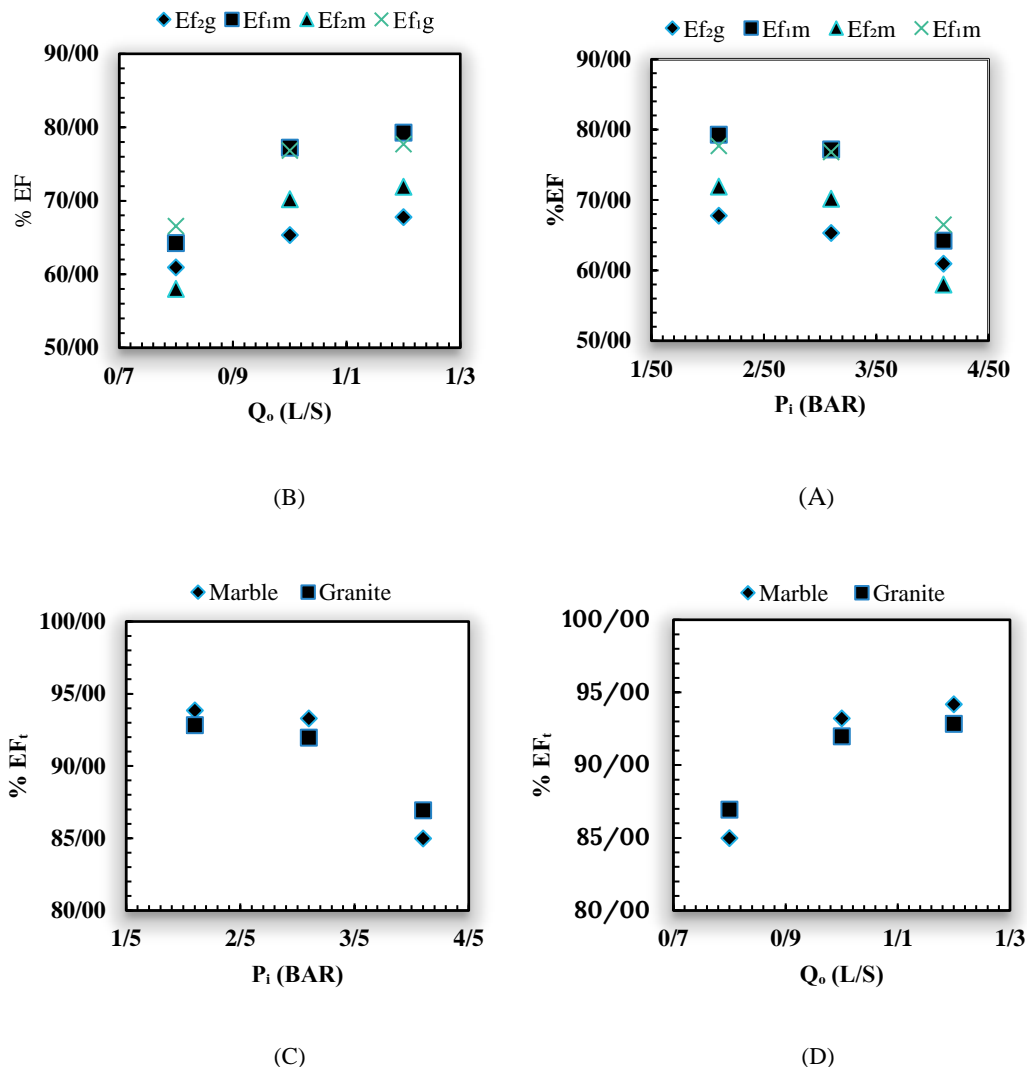


Fig. 1. Graphs of efficiency (%EF) of hydrocyclone performance in terms of inlet pressures (Pi) and input flow (Qo) for treatment stage 1&2 (A) and (B), Total treatment (C) and (D).

4) Discussion and Conclusion

Stone cutting wastewater recycling is important in protection of underground water resources. With using of hydrocyclone as an economic method for the wastewater treatment of these industrial units, it

Azam Ahmadi Ghadikolaei, Mohsen Masoudian*, Davood Kalantari, Omolbani Mohammadrezapour

seems to be necessary to study and investigate the effective factors on improve the performance of hydrocyclone. The results of the experiments showed that in a constant weight concentration and flow ratio, the efficiency of particle separation and wastewater treatment is inversely related to the hydrocyclone inlet pressure. The decrease in the input flow rate of the hydrocyclone and the increase in its inlet pressure caused a decrease in the separation efficiency, because of increasing the flow disturbances inside the hydrocyclone and as a result, decreasing the rotation speed of the fluid. In this way, reducing the inlet pressure to 2 bar, increased the separation efficiency by 11.19% and 15.07%, respectively, in the first stage of treatment and in the second stage of treatment increased the separation efficiency of granite and marble particles by 6.84% and 12.23%, respectively. Retreatment of the overflow obtained from the first stage hydrocyclone treatment had a significant effect on improving the separation efficiency and reducing the diameter of the particles in the treated wastewater. with retreatment, the separation efficiency of marble and granite particles from wastewater increased by 20.81% and 20.4%, respectively And the maximum diameter of the particles in the marble and granite wastewater decreased by 95.13% and 94.2%, respectively, after two consecutive treatment stages. Due to the location of most of the stone cutting industrial units in the dry and low water areas of Iran and the high price of water supply in these areas, it is recommended to use these results in the stone cutting industry.

5) Six important references

- 1) Grave1, J. C. Paulo1, C. I. Petit, H. A & Irassar, E. F. 2021. Optimal design of cyclones in series for the separation of multicomponent mixtures of Portland cement, *Journal of EPJ Web of Conferences* 249, 12003, *Powders and Grains*, 4 pages.
- 2) Hwang, K.J., Lyu, S.Y. & Nagase, Y. 2009. Particle separation efficiency in two 10-mm hydrocyclones in series. *Jornal of the Taiwan Istitute of Chemical Engineers*, 40(3), 333-319.
- 3) Naderi, A., No, M. S. M., Masoudian, M. & Habibian, M. 2018. Separation of fine particles due to granite rock cutting in the effluent of stone cutting industry, by hydro cyclone, 16th National Congress of Chemical Engineering *In: Amirkabir University of Technology, F. O. C. E. (ed.) 16th National Congress of Chemical Engineering of Iran*. Tehran, Iran.
- 4) Naderi, A., Masoudian, M. & Habibian, M. 2019a. Recycling and reuse of waste water from stone cutting using the hydro cyclone method, an economic solution to reduce water consumption. *Water and Wastewater*, 31, 153-167.
- 5) Naderi, A., Masoudian, M. & Habibian, M. 2019b. Evaluation and application of hydro cyclone in separation of rock solid particles from industrial stone effluent. *4th National Congress of Mechanical Engineering and Chemical Engineering*. Iran.
4. Ozyonar, F. & Karagozoglu, B. 2012. Systematic assessment of electrocoagulation for the treatment of marble processing wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 637-646.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

تحلیل بازده شبکه دو هیدروسیکلون هم‌سایز سری در تصفیه پساب کارخانه‌های

صنعتی سنگ‌بری گرانیت و مرمریت

اعظم احمدی قادیکلای^۱، محسن مسعودیان^۲، داود کلانتری^۳، ام‌البنی محمدرضایپور^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

مقاله پژوهشی

چکیده

اکثر کارخانه‌های سنگ‌بری کشور در مناطق کم آب واقع‌اند و آب مورد نیاز آن‌ها با حفر چاه‌های عمیق تامین می‌شود. برای کاهش مصرف آب، پساب تولیدی به روش سنتی با حوضچه‌های ته‌نشینی با بازده کم تصفیه می‌شوند. اخیراً استفاده از هیدروسیکلون‌ها جهت تصفیه پساب با بازده بالا معرفی شده و کاربرد آن رو به افزایش است. لذا شناخت عوامل موثر بر بهبود بازده تصفیه هیدروسیکلون اهمیت بالایی دارد. در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای هیدرولیکی شدت جریان، فشار ورودی و تأثیر تصفیه مجدد سرریز (یک و دوبار تصفیه)، بر عملکرد هیدروسیکلونی به قطر ۱۴۰ میلی‌متر بررسی شد. آزمایش‌ها برای جداسازی ذرات پودر سنگ گرانیت و مرمریت به روش سطح پاسخ توسط نرم‌افزار Design Expert.10 طراحی شدند. طبق نتایج به‌دست آمده، با افزایش جریان ورودی از ۰/۷ تا ۱/۳ لیتر بر ثانیه و کاهش فشار ورودی از ۴/۱ تا ۲/۱ بار بازده جداسازی ذرات در مرحله اول تصفیه پساب گرانیت و مرمریت به ترتیب ۱۱/۱۹ و ۱۵/۰۴ درصد و در مرحله دوم تصفیه به ترتیب ۶/۸۴ و ۱۲/۲۳ درصد افزایش یافت، همچنین تصفیه مجدد سرریز خروجی از هیدروسیکلون، بازده جداسازی کلی تصفیه پساب گرانیت و مرمریت را به ترتیب به میزان ۱۶/۲۴ و ۱۵/۱۶ درصد افزایش داد. با توجه به بهای بالای تامین آب در این کارخانه‌ها، تغییر فشار و دبی ورودی هیدروسیکلون و تصفیه مجدد سرریز مرحله اول تصفیه، بدون نیاز به افزودن هیدروسیکلون و سایر تجهیزات، جهت بهبود بازده تصفیه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بازده جداسازی، پساب، تصفیه مجدد.

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران،
azamahmadi804@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، mohsen_masoudian@yahoo.com
(نویسنده مسئول)

^۳ دانشیار، گروه مکانیک بیو سیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، dkalantari2000@yahoo.com

^۴ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،
nmohammadrezapour@yahoo.com



مقدمه

واحدهای صنعتی سنگبری ایران در چرخه تولید، آب زیادی مصرف می‌کنند. اکثر این واحدهای صنعتی در مناطق خشک و کم آب واقع‌اند که برای تأمین آب مورد نیاز مجبور به حفر چاه‌های عمیق می‌باشند. طبق مطالعات قبلی (Ozyonar and Karagozoglu, 2012) میزان مصرف روزانه آب در واحدهای صنعتی سنگبری را به‌طور متوسط ۵۰ تا ۱۵۰ مترمکعب برآورد کردند که پساب حاصل از آن دارای ۲ تا ۱۰ درصد ذرات پودر سنگ می‌باشد. بنابراین تصفیه پساب به‌دست آمده و بازچرخانی آن در خط تولید، موجب کاهش معنی‌دار مصرف آب و حفظ منابع آب‌های زیرزمینی در این مناطق می‌شود. به‌علت پایین بودن بازده تصفیه پساب سنگبری به روش مرسوم حوضچه‌های ته‌نشینی، نادری و همکاران (۱۳۹۸) به‌تازگی کاربرد هیدروسیکلون را به‌عنوان روشی مناسب جهت تصفیه پساب سنگبری پیشنهاد کردند. (Marthinussen et al. 2014) کاربرد هیدروسیکلون‌ها را در جداسازی فاز جامد از مایع به‌دلیل سهولت ساخت مقرون به‌صرفه دانستند که به دلیل نداشتن قطعات متحرک، قابلیت کاربرد در بخش‌های مختلف صنعت را دارا می‌باشند. از آنجایی که جداسازی ذرات ریزتر با روش ته‌نشینی ثقلی امکان‌پذیر نیست، لذا استفاده از هیدروسیکلون‌ها جهت جداسازی ذرات جامد از مایع گسترش بیشتری پیدا کرده‌است. (Dhakal et al. 2021) کاربرد هیدروسیکلون‌ها را به‌طور گسترده در صنایع مختلف برای طبقه‌بندی، جداسازی و مرتب‌سازی ذرات در سوسپانسیون‌های مایع و تصفیه‌خانه‌های صنعتی و آب مناسب دانستند. جمشیدی‌فرد و همکاران (۱۳۹۷) با ثابت دانستن اصول حاکم بر رفتار سیکلون‌ها، پیدا کردن شرایط بهینه که قادر باشد با کاهش مصرف انرژی و حداقل کردن هزینه، کارایی جداسازی ذرات ریز توسط سیکلون‌ها را افزایش دهد، دارای اهمیت دانستند که با توجه به کاربردهای صنعتی مختلف سیکلون‌ها، بهبود اساسی در طراحی آن‌ها به‌وجود آید. (Zhang et al. 2017) در پیش‌بینی محدوده بهینه نرخ جریان ورودی در هیدروسیکلون با استفاده از روش ترکیبی الگوی

جریان و مدل‌های توابع (FP-EM) به این نتیجه رسیدند هر چه دبی ورودی جریان کمتر باشد، میدان جریان داخلی هیدروسیکلون ناپایدارتر خواهد بود و به علت شدت تلاطم و ناپایداری هسته هوا، بازده جداسازی کاهش می‌یابد. در مطالعه ایشان با توجه به محدودیت حداقل جریان (ناپایداری جریان داخلی) و محدودیت حداکثر جریان (مصرف بالای انرژی) محدوده دبی ورودی ۱۵ الی ۵۵ لیتر بر دقیقه، به عنوان محدوده بهینه دبی ورودی بیان شد. نادری و همکاران (۱۳۹۸) تاثیر غلظت وزنی پساب سنگبری بر عملکرد هیدروسیکلون در تصفیه پساب را بررسی کردند. نتایج نشان داد بازده تصفیه با غلظت پساب رابطه عکس دارد. نادری و همکاران (۱۳۹۷) تاثیر شدت جریان ورودی با مقادیر ۱۰۰ تا ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ثانیه را بر بازده جداسازی ذرات پودر سنگ تراورتن بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش شدت جریان ورودی، بازده جداسازی افزایش می‌یابد و بهترین بازده برابر با ۹۱/۷ درصد در بیشترین شدت جریان به دست آمد. نادری و همکاران (الف ۱۳۹۸) جداسازی پودر سنگ‌های گرانیت و تراورتن با ذراتی کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرون از پساب سنگبری را در افت فشارهای کمتر از ۳ بار بررسی کردند. نتایج نشان داد بازده جداسازی با افت فشار متناسب بوده و با افزایش افت فشار از ۰/۸۷ تا ۲/۶۳ بار، بازده جداسازی ذرات از ۸۷/۲ تا ۸۸/۷ درصد، افزایش می‌یابد. (Liu et al. 2022) در بررسی اثر فشار برگشتی ناشی از اتصال سرریز به تجهیزات بعدی بر عملکرد هیدروسیکلون به این نتیجه رسیدند که افزایش فشار برگشتی، افت فشار کل هیدروسیکلون را افزایش می‌دهد. ولی تاثیر قابل توجهی بر گرادیان فشار شعاعی داخلی ندارد و فقط مصرف انرژی هیدروسیکلون را افزایش و دقت جداسازی را کاهش می‌دهد (موجب حرکت ذرات ریز به سمت ته‌ریز و ذرات درشت به سمت سرریز می‌شود). در بررسی تجربی تاثیر تعداد خروجی‌های ذرات و دبی جریان بر بازده جداسازی در هیدروسیکلون‌های تک جریان، تعداد ۱، ۲ و ۴ خروجی بر عملکرد جداکننده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تعداد بیشتر خروجی‌ها تاثیر قابل اندازه‌گیری بر بازده

پساب سنگ‌بری و همچنین نبود بررسی تأثیر فشارهای ورودی بالاتر از ۳ بار بر بهبود عملکرد هیدروسیکلون در تصفیه پساب سنگ‌بری، در این تحقیق عامل‌های فوق بررسی شدند.

مواد و روش‌ها

هیدروسیکلون دستگاهی است که با کمک نیروی گریز از مرکز (رابطه ۱)، ذرات با چگالی مختلف را از مایع جدا می‌کند. در این معادله F_C نیروی گریز از مرکز بر حسب (N) می‌باشد.

$$F_C = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} r \omega^2 \quad \text{رابطه ۱}$$

هیدروسیکلون برای عملکرد مناسب نیاز به افت فشار مشخصی دارد که وابسته به ساختار و ظرفیت آن است. با افزایش فشار ورودی هیدروسیکلون، سرعت سیال در مجرای ورودی آن افزایش یافته، لذا سرعت چرخش سیال و ذرات معلق در آن افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت چرخش سیال و ذرات معلق در آن باعث بیشتر شدن نیروی گریز از مرکز شده و ذرات به سمت بیرون و در نتیجه جداره فولادی داخل هیدروسیکلون منتقل می‌شوند که با چندین بار چرخش در داخل هیدروسیکلون به سمت ته‌ریز هیدروسیکلون منتقل می‌شوند. البته در مقابل نیروی گریز از مرکز وارد بر ذره، نیروی پسا (درگ) F_d بر حسب (N) نیز به ذره وارد می‌شود که مقدار این نیرو به ابعاد ذره و سرعت خطی گریز از مرکز ذره (سرعت حرکت ذره به سمت جداره‌های هیدروسیکلون) وابسته است که در رابطه ۲ بیان شده است.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \rho_p u_p^2 \quad \text{رابطه ۲}$$

با توجه به این که نیروی گریز از مرکز با توان ۳ قطر ذره و در مقابل نیروی پسا (درگ) با مجذور قطر ذره متناسب است، لذا ذرات بزرگ‌تر شناور در سیال راحت‌تر به سمت بیرون منتقل شده و از سیال جدا می‌شوند. در معادلات بالا C_d (ضریب درگ) بوده و با توجه به بزرگی عدد رینولدز Re از رابطه‌های ۳ و ۴ به دست می‌آید.

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^2 \right) ; Re < 1000 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$C_d = 0.424 ; Re > 1000 \quad \text{رابطه ۴}$$

جداسازی ندارند. در حالی که دبی ورودی بالا تأثیر مثبت بر جداسازی دارد اما منجر به افزایش افت فشار می‌شود (Senfter et al. (2023). Ray et al. (1998) به علت ناکارآمدی سیکلون‌های منفرد در جداسازی ذرات ریزتر (کوچک‌تر از ۵ میکرون) ترکیب سیکلون‌ها به صورت موازی و سری را برای افزایش بازده جداسازی ذرات ریز در حد میکرون توصیه کردند. Luciano et al. (2018) بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌ی سیکلون‌ها را که به صورت سری به هم متصل‌اند را ناکافی دانست درحالی‌که مطالعات فراوانی درباره بهینه‌سازی عملکرد سیکلون‌های منفرد انجام شده‌است. Hwang et al. (2009) تأثیر اتصال سری دو هیدروسیکلون با قطر ثابت بر افزایش بازده جداسازی دو نمونه از ذرات را با استفاده از گروه‌های بی‌بعد نظیر عدد رینولدز، عدد اولر و نسبت تقسیم جریان، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این اتصال باعث کاهش قابل توجه d_{50} شد ولی بر d_{100} تأثیر قابل توجهی نداشت. Venkatesh et al. (2020) عملکرد ترکیب سری و موازی چهار سیکلون را در جداسازی ذرات ریز با قطر ۷ میکرومتر، بررسی کردند. نتایج نشان داد بازده جداسازی در ترکیب سیکلون‌ها، ۴۰ درصد بیشتر از بازده جداسازی سیکلون منفرد می‌باشد و در ترکیب سری و موازی سیکلون‌ها بیشترین افت فشار مربوط به اولین سیکلون بوده و ذرات بزرگ‌تر در سیکلون اول تجمع یافتند. در مطالعه طراحی بهینه دو سیکلون سری جهت جداسازی اجزای سیمان پرتلند، از معادلات تعادل جرم، طراحی هندسی سیکلون، محاسبه بازده و محدودیت‌های عملیاتی و افت فشار تجهیزات استفاده شد، نتایج نشان داد کاهش حد برش ذرات منجر به طراحی سیکلونی با ابعاد بزرگ‌تر خواهد شد. کاهش مواد جامد تغذیه شده تا ۵۰٪ حداکثر مقدار آن باعث کاهش قابل ملاحظه مقادیر بازده نمی‌شود (Gravel et al. (2021).

بررسی شرایط بهبود عملکرد هیدروسیکلون در تصفیه پساب سنگ‌بری، به دلیل اهمیت بالای تصفیه و بازچرخانی آب‌ها در حفظ منابع آب زیرزمینی، ضروری به نظر می‌رسد. لیکن به دلیل کافی نبودن تحقیقات لازم درباره تأثیر تصفیه مجدد سرریز هیدروسیکلون بر میزان افزایش بازده تصفیه

در معادله‌های بالا ρ_p و ρ_f به ترتیب چگالی ذره جامد و چگالی سیال بر حسب $(Kg\ m^{-3})$ ، ω سرعت زاویه‌ای سیال بر حسب (s^{-1}) ، u_f و u_p به ترتیب سرعت ذره جامد و سرعت سیال بر حسب (ms^{-1}) ، d_p قطر ذره جامد بر حسب (m) ، μ لزوجت سیال پایه بر حسب $(Kg\ m^{-1}\ s^{-1})$ و f_p ضریب اصطکاک بین ذره و سیال می‌باشند.

تجهیزات آزمایشگاهی

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل پودر سنگ گرانیت و مرمریت موجود در پساب کارخانه سنگ‌بری شهرک صنعتی محمودآباد اصفهان می‌باشد که از خشک کردن دوغاب کارخانه به‌دست آمد. مشخصات فیزیکی این پودر سنگ‌ها در جدول ۱ آمده‌است.

جدول (۱): خصوصیات فیزیکی پودر سنگ‌ها

اندازه ذرات (μm)	چگالی (Kg/m^3)	نوع پودر سنگ
<500	2750	گرانیت
<500	3020	مرمریت

نظر (مشابه با غلظت پساب کارخانه) مخلوط شده و وارد سامانه آزمایشگاهی شدند. شکل ۱ نمای کلی از سامانه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

عدد رینولدز در رابطه‌های بالا، در داخل هیدروسیکلون از رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

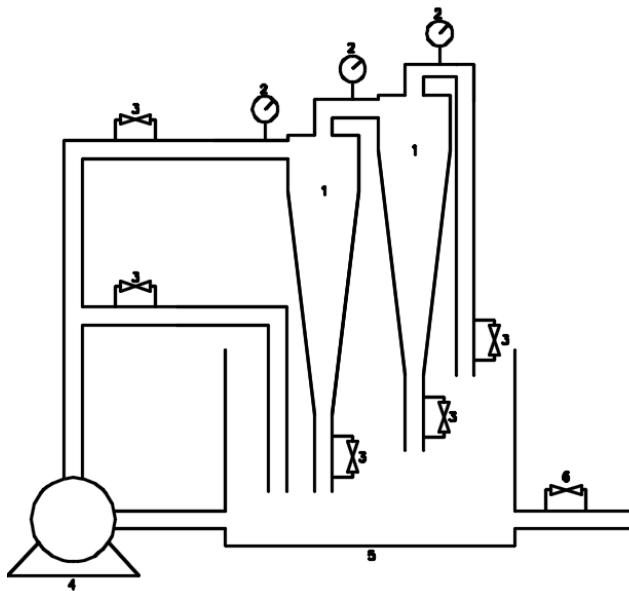
$$Re = \frac{\rho d_p |u_f - u_p|}{\mu} \quad \text{رابطه ۵}$$

عبارت $u_f - u_p = u_{sl}$ ، سرعت لغزش ذرات بوده و مربوط به اختلاف سرعت بین مولکول‌های سیال پیوسته و ذرات جامد معلق در سیال می‌باشد که از رابطه ۶ قابل محاسبه است (Liu et al., 2017).

$$u_{sl} = 1.89 \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_f)}{f_p 7.48 \rho_f}} \quad \text{رابطه ۶}$$

طبق رابطه ۶، با افزایش قطر ذره و چگالی نسبی ذره نسبت به سیال، سرعت لغزشی بین ذره و سیال پیوسته افزایش یافته و حرکت ذره نسبت به حرکت سیال کندتر خواهد بود.

برای جداسازی ذرات ریزتر از ۵۰۰ میکرون، پودر سنگ‌های به‌دست آمده از الک نمره ۳۵ رد شدند، سپس این ذرات ریز با مقداری آب برای رسیدن به غلظت وزنی مورد



شکل (۱): سامانه آزمایشگاهی: ۱- هیدروسیکلون ۲- فشارسنج ۳- شیر کنترل دبی ۴- الکتروپمپ ۵- مخزن ۶- شیر تخلیه.

آنالیز اندازه قطر ذرات موجود در نمونه‌های اخذ شده از سرریز تصفیه مرحله اول و دوم پساب‌ها در پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران به وسیله دستگاه *Particle Analyzer* انجام شد.

هیدروسیکلون مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد می‌باشد که در کارخانه ماشین‌گستر جوبارساخته شد و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نصب گردید. مشخصات هندسی هیدروسیکلون مورد آزمایش در جدول ۲ ذکر شده‌است.

جدول (۲): اندازه بخش‌های مختلف هیدروسیکلون مورد استفاده.

اندازه (mm)	بخش‌های مختلف هیدروسیکلون
۱۴۰	قطر بدنه
۳۵	قطر سرریز
۳۵	قطر ته‌ریز
۳۵	قطر ورودی
۱۱۰	ارتفاع بخش استوانه‌ای
۴۴۰	ارتفاع بخش مخروطی

در محدوده ۰/۷ تا ۱/۳ برحسب لیتر بر ثانیه و فشار ورودی سیستم (P_i) در محدوده ۲/۱ تا ۴/۱ بر حسب بار، به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. مشخصات آزمایش‌های طراحی شده و نتایج به دست آمده برای پودرسنگ‌های گرانیت و مرمریت در جدول ۳ نشان داده شد. تحلیل آماری (ANOVA) نتایج با کمک نرم افزار Design Expert.10 و

طراحی آزمایش‌ها

از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۰ جهت طراحی اولیه آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد، به طوری که پارامتر بازده جداسازی (Efficiency) در مرحله اول تصفیه پساب (EF_1)، بازده جداسازی در مرحله تصفیه مجدد (EF_2) و بازده کلی (Eft) به‌عنوان پاسخ و پارامترهای دبی جریان ورودی به سیکلون (مجموع دبی ته‌ریز و سرریز) (Q_0)

با روش سطح پاسخ (RSM) و مدل CCD انجام و در جداول ۴ و ۵ ارائه شد.

جدول (۳): مشخصات آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم افزار Design Expert.10

بازده تصفیه کلی (%)		بازده تصفیه مجدد (%)		بازده تصفیه مرحله اول (%)		فشار ورودی (bar)		شدت جریان ورودی (ls ⁻¹)	
مرمریت	گرانیت	مرمریت	گرانیت	مرمریت	گرانیت	مرمریت	گرانیت	مرمریت	گرانیت
۹۴/۷۴	۹۳/۰۱	۷۳/۶۳	۶۹/۹۲	۸۰/۰۴	۷۶/۷۷	۲/۱	۲/۱	۱/۱۲	۱/۳
۹۲/۶۸	۹۲/۷۴	۶۵/۳۳	۶۷/۱۲	۷۸/۸۹	۷۷/۹۳	۲/۱	۲/۱	۱/۱۱	۱/۳۷
۹۴/۰۳	۹۲/۷۳	۷۱/۷۵	۶۶/۳۱	۷۸/۸۷	۷۸/۴۳	۲/۱	۲/۱	۱/۱۵	۱/۲۴
۹۴/۱۴	۹۲/۱۹	۷۰/۴۵	۶۹/۹۹	۸۰/۱۷	۷۳/۹۸	۳/۱	۳/۱	۱/۲۶	۱/۰۷
۹۳/۰۲	۹۲/۰۶	۷۱/۱۵	۶۲/۷۹	۷۵/۸۱	۷۸/۶۶	۳/۱	۳/۱	۰/۹۷	۱/۱۳
۹۲/۶۹	۹۱/۸۴	۷۰/۰۱	۶۳/۱۸	۷۵/۶۳	۷۷/۸۳	۳/۱	۳/۱	۰/۹۲	۱/۰۹
۸۵/۵۹	۸۷/۱۹	۵۷/۰۸	۶۰/۵۸	۶۶/۴۳	۶۷/۵۱	۴/۱	۴/۱	۰/۷۴	۰/۹۰۶
۸۶/۴۳	۸۶/۴۷	۵۶/۹۶	۶۰/۹۸	۶۸/۴۶	۶۵/۳۳	۴/۱	۴/۱	۰/۷۸	۰/۹۱۱
۸۳/۰۹	۸۷/۱۰	۵۹/۹۴	۶۱/۲۵	۵۷/۷۹	۶۶/۷۲	۴/۱	۴/۱	۰/۷۷	۰/۹۶۵

جدول (۴): تحلیل آماری آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ بازده جداسازی کلی (Ef_i) گرانیت

میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۱۶/۷۰**	۵	مدل
۰/۳۸*	۱	فشار ورودی (P _i)
۰/۱۹ ^{N.S}	۱	دبی ورودی (Q _۰)
۰/۲۰ ^{N.S}	۱	فشار ورودی × دبی ورودی
۰/۱۳ ^{N.S}	۱	فشار ورودی × فشار ورودی
۰/۲۱ ^{N.S}	۱	دبی ورودی × دبی ورودی

جدول (۵): تحلیل آماری آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ بازده جداسازی کلی (Ef_i) مرمریت

میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۷۰/۳۱**	۵	مدل
۱۲/۱۱**	۱	فشار ورودی (P _i)
۱/۹۹ ^{N.S}	۱	دبی ورودی (Q _۰)
۱۴/۷۶**	۱	فشار ورودی × دبی ورودی

نتایج تحلیل آماری آزمایش‌ها نشان می‌دهد روش آماری سطح پاسخ در به دست آوردن بیشترین بازده جداسازی از کارایی لازم برخوردار است.

و برای بار دوم در شرایط آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۲، مورد تصفیه قرار گرفت تا تأثیر استفاده از یک شبکه سری دوتایی از هیدروسیکلون، بر افزایش بازده تصفیه پساب سنگبری نسبت به یک هیدروسیکلون منفرد مورد تحلیل قرار گیرد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا تأثیر پارامترهای عملیاتی مورد آزمایش بر بازده تصفیه هیدروسیکلون منفرد بررسی می‌شود، سپس تأثیر تصفیه مجدد بر بهبود بازده تصفیه و کاهش اندازه قطر ذرات بررسی می‌گردد.

تأثیر پارامترهای عملکردی هیدروسیکلون بر بازده جداسازی در تصفیه پساب

تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مانند فشار و دبی ورودی هیدروسیکلون بر بازده جداسازی ذرات، در دو مرحله متوالی تصفیه پساب گرانیات و مرمیت با انجام آزمایش‌های مختلف و سه تکرار متوالی برای هر آزمایش بررسی شد. در این آزمایش‌ها غلظت وزنی نمونه‌ها ثابت و مشابه با غلظت وزنی پساب تولیدی کارخانه‌های سنگبری ۴ درصد انتخاب شد. با توجه به نتایج آزمایشات قبلی که بیشترین بازده جداسازی در نسبت تقسیم جریان‌های ۱۰ درصد رخ می‌دهد تمام آزمایشات این تحقیق در این نسبت تقسیم جریان بررسی شدند. نتایج آزمایشات به صورت میانگین در نمودارهای شکل ۲ نشان داده شد.

تصفیه پساب سنگبری (مرحله اول)

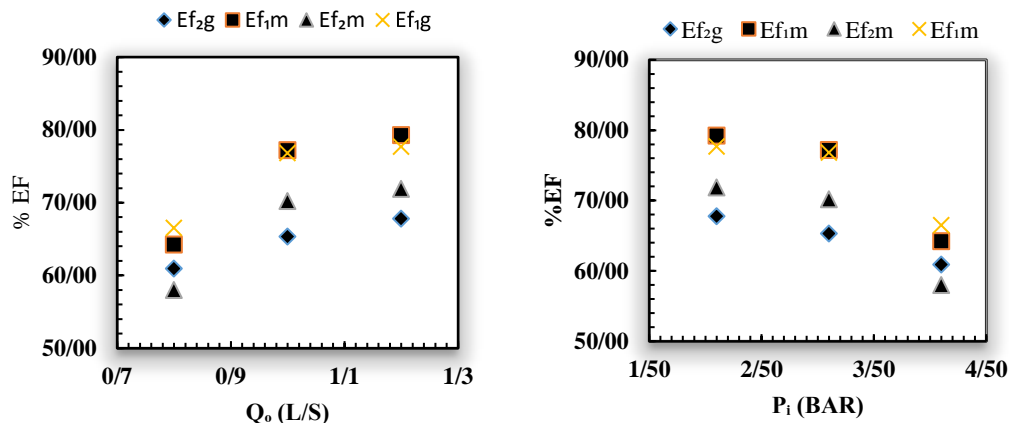
کلیه آزمایش‌ها مطابق با شرایط آزمایشگاهی ارائه شده توسط نرم‌افزار که با روش سطح پاسخ طراحی و در جدول ۲ ارائه شد، انجام شد. قبل از انجام آزمایشات ۲۰ لیتر از پساب مورد آزمایش در مخزن تهیه و توسط پمپ سانتریفیوژ به داخل هیدروسیکلونی به حجم ۳/۹ لیتر تزریق شد. جهت تنظیم فشار مورد نظر از شیرهای سوزنی تعبیه شده در سامانه آزمایشگاهی استفاده گردید. جهت افزایش دقت اندازه‌گیری، هر آزمایش با سه تکرار انجام شد. ابتدا فشار ورودی و فشار سرریز ثبت و دبی حجمی خروجی از سرریز و ته‌ریز اندازه‌گیری شد و نمونه‌های گرفته شده با حجم مشخص از ته‌ریز و سرریز به مدت ۲۴ ساعت در آون نگهداری و خشک شدند. سپس جرم ماده خشک باقی‌مانده اندازه‌گیری و بازده جداسازی ذرات در هر مرحله از آزمایش از رابطه ۷ به‌دست آمد:

$$Ef = \frac{M_u}{M} \quad \text{رابطه ۷}$$

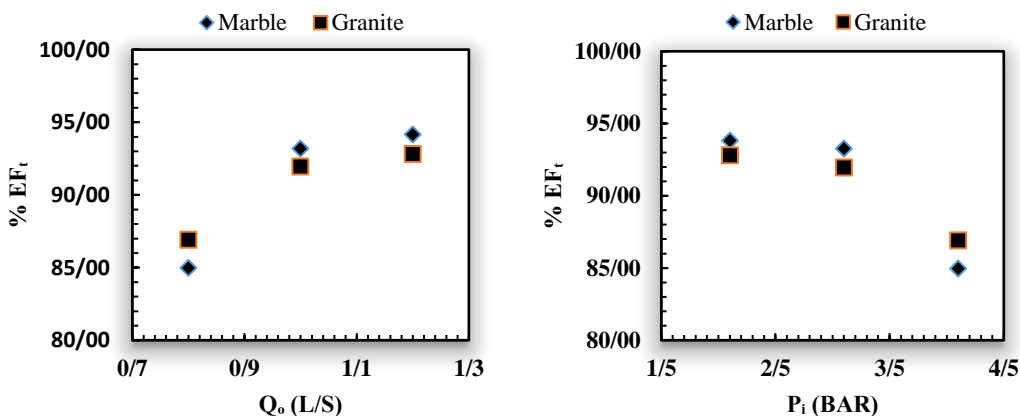
در این رابطه M_u جرم پودر سنگ داخل ته‌ریز بر واحد حجم، M جرم پودر سنگ در محلول ورودی به هیدروسیکلون (مجموع سرریز و ته‌ریز) بر واحد حجم و Ef بازده جداسازی ذرات توسط هیدروسیکلون می‌باشند.

تصفیه مجدد سرریز تصفیه شده مرحله اول

در این مرحله، ۴۰ لیتر پساب اولیه تهیه و آزمایش بهینه مرحله اول تکرار شد و از سرریز این آزمایش ۲۰ لیتر برداشت



(الف)



(ب)

شکل (۲): نمودارهای بازده جداسازی هیدروسیکلون (%EF) بر حسب فشارهای ورودی مختلف (P_i) و دبی خروجی (Q_o): (الف) بازده جداسازی مرحله اول (Ef_{1g}) و (Ef_{1m}) و دوم تصفیه (Ef_{2g}) و (Ef_{2m})، گرانیت و مرمیت (ب) بازده جداسازی کلی (Ef_t)، گرانیت و مرمیت.

تأثیر پارامتر فشار ورودی (P_i)

تصفیه پساب مرمیت از ۷۹/۲۷ درصد به ۶۴/۲۳ درصد کاهش یافت که این موضوع مرتبط با کاهش دبی پمپ گریز از مرکز (سانتریفوژ) مورد استفاده در حین افزایش فشار بود که در نهایت منجر به کاهش سرعت مماسی جریان ورودی به هیدروسیکلون می شود. این نتیجه با نتایج آزمایش های نادری و همکاران (2020) که تاثیر افت فشارهای تا ۳ بار (افت فشار ۰/۵ تا ۳ بار) بر بازده جداسازی را بررسی کردند، مطابقت دارد. افزایش مقدار نیروی درگ وارد بر ذرات (رابطه ۲) که با کاهش

هنگامی که کل حجم هیدروسیکلون پر از مخلوط آب و پودرسنگ است و خروجی های آن (سرریز و تهریز) بسته اند فشار در ورودی هیدروسیکلون حداکثر است، به مرور که شیرهای خروجی باز می شوند فشار داخل هیدروسیکلون کاهش می یابد که با کاهش اغتشاشات و کاهش نیروی گریز از مرکز، باعث افزایش بازده جداسازی و بهبود تصفیه پساب می شوند. به طور نمونه، در نمودار (الف) شکل ۲ با افزایش فشار ورودی از ۲/۱ به ۴/۱ بار، بازده جداسازی مرحله اول

و ۶/۸۴ درصد برای گرانیته، ۱۵/۰۸ و ۱۲/۲۳ درصد برای مرمیت افزایش یافت.

تأثیر تصفیه مجدد (دوبار تصفیه) بر بهبود بازده جداسازی کلی

با توجه به نمودارهای (ب) در شکل ۲ تصفیه مجدد سرریز تصفیه مرحله اول، تأثیر معنی‌داری بر افزایش بازده جداسازی ذرات در فشارها و دبی‌های مختلف برای گرانیته و مرمیت دارد، در دبی ورودی ۰/۸ لیتر بر ثانیه، بر اثر تصفیه مجدد، بازده جداسازی مرمیت و گرانیته به ترتیب ۱۴/۵۶ و ۱۵/۱۱ افزایش یافت. در دبی ورودی ۱ لیتر بر ثانیه، بر اثر تصفیه مجدد، بازده جداسازی مرمیت و گرانیته به ترتیب ۱۶/۰۸ و ۱۵/۱۴ درصد افزایش یافت. در دبی ورودی ۱/۲ لیتر بر ثانیه، بر اثر تصفیه مجدد، بازده جداسازی مرمیت و گرانیته به ترتیب ۲۰/۷۴ و ۲۰/۴ درصد افزایش یافت. با دو مرحله تصفیه متوالی، بازده جداسازی کلی گرانیته و مرمیت بهبود یافت و به حداکثر ۹۳/۰۱ و ۹۴/۷۴ درصد رسید که بابت بازچرخانی آب به کارخانه مطلوب به نظر می‌رسد.

تأثیر یک و دوبار تصفیه بر کاهش اندازه ذرات سرریز

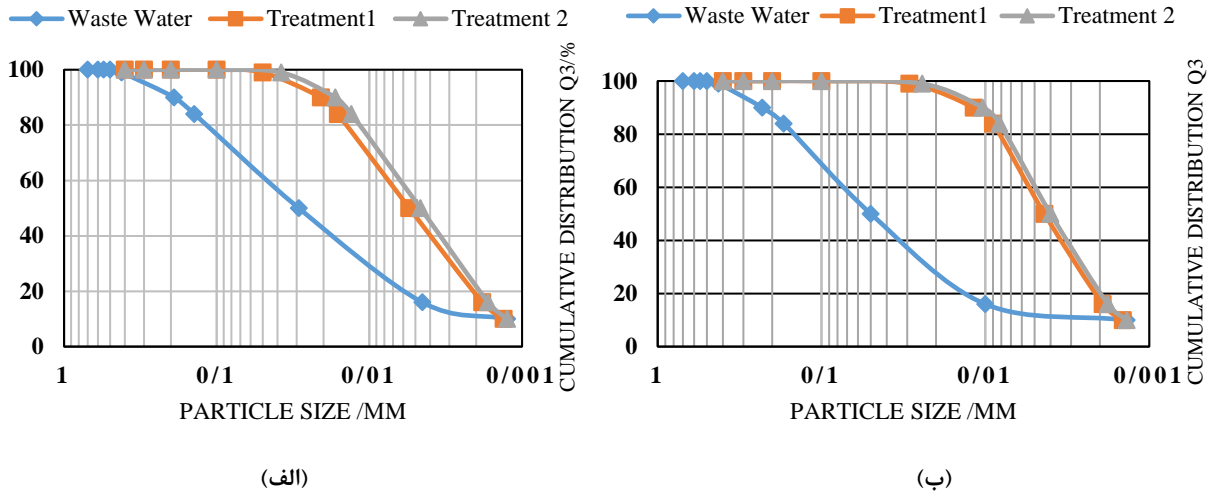
در هیدروسیکلون‌ها همواره ذرات درشت‌تر با اعمال نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره‌ها رفته و از بخش ته‌ریز خارج می‌شوند و آب تصفیه شده از بخش سرریز خارج می‌شود، ذرات ریزتر که سبک‌تر می‌باشند، همراه سیال بخش مرکزی از سرریز خارج می‌شوند. ذرات موجود در نمونه‌های اخذ شده از سرریز تصفیه مرحله اول و دوم پس‌آبها در پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران اندازه‌گیری و نتایج آن به صورت منحنی دانه‌بندی در شکل ۳ نشان داده شد. مطابق با نتایج منحنی دانه‌بندی در شکل ۳، d_{100} در مرحله اول و دوم تصفیه با d_{100} پس‌آب اختلاف معنی‌داری دارند. ولی d_{100} تصفیه مرحله اول و دوم اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند که با نتیجه آزمایش Hwang et al. (2009) مطابقت دارد.

تأثیر نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌شود و کاهش بازده جداسازی را به‌دنبال دارد، تحت تأثیر مقدار عدد رینولدز جریان داخل هیدروسیکلون می‌باشد (رابطه‌های ۳ و ۴). مقدار عدد رینولدز طبق رابطه ۵ بستگی به اختلاف سرعت بین ذرات جامد و سیال دارد. در فشارهای ورودی بالاتر که جریان کمتری از هیدروسیکلون خارج می‌شود و اغتشاشات داخل آن بیشتر است، اصطکاک بین ذرات جامد با سیال بیشتر بوده و در نتیجه طبق رابطه ۶، سرعت لغزشی بین ذرات و سیال کاهش و در نتیجه عدد رینولدز طبق رابطه ۵ کاهش می‌یابد که با افزایش ضریب درگ C_d و به‌دنبال آن با کاهش نیروی گریز از مرکز همراه است. در واقع مقدار فشار داخل هیدروسیکلون تعیین کننده مرز عدد رینولدز جهت افزایش یا کاهش نیروی درگ وارد بر ذرات می‌باشد. طبق شکل ۲ (الف) با کاهش فشار به اندازه ۲ بار، بازده جداسازی ذرات در مرحله اول و دوم تصفیه، به ترتیب ۱۱/۱۹ و ۶/۸۴ درصد برای گرانیته، ۱۵/۰۸ و ۱۲/۲۳ درصد برای مرمیت افزایش یافت.

تأثیر پارامتر دبی ورودی (Q_0)

با افزایش دبی ورودی به هیدروسیکلون، فشار ورودی داخل هیدروسیکلون که ناشی از عملکرد پمپ گریز از مرکز می‌باشد، کاهش می‌یابد. به‌دنبال کاهش فشار ورودی هیدروسیکلون، اغتشاشات جریان کاهش می‌یابد که این کاهش فشار ورودی و در نتیجه افزایش دبی ورودی منجر به افزایش سرعت جریان

ورودی و در نتیجه افزایش نیروی گریز از مرکز شده که در نهایت موجب افزایش بازده جداسازی و بهبود تصفیه پس‌آب می‌شود. این یافته با نتیجه آزمایش نادری و همکاران (۱۳۹۸ب) و Zhang et al. (2017) مطابقت دارد. در نمودار (الف) شکل ۲ با افزایش دبی ورودی به اندازه ۰/۴ لیتر بر ثانیه (افزایش دبی از ۰/۸ لیتر بر ثانیه به ۱/۲ لیتر بر ثانیه) بازده جداسازی ذرات در مرحله اول و دوم تصفیه، به ترتیب ۱۱/۱۹



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی ذرات جامد موجود در پساب، تصفیه مرحله اول و تصفیه مرحله دوم: الف) مرمیت می‌گرانیت، ب) مرمیت ب) گرانیته.

به دست آمد به طوری که رابطه‌های ۸ و ۹ به ترتیب مربوط به تصفیه نهایی پساب مرمیت و گرانیته می‌باشند.

$$Ef_t = +147.08 - 18.90 * P_i - 45.64 * Q_o + 16.16 * Q_o * P_i$$

$$Ef_t = +1194.62 - 217.03 * P_i - 1386.37 * Q_o + 141.39 * Q_o * P_i + 9.46 * P_i^2 + 431.28 * Q_o^2$$

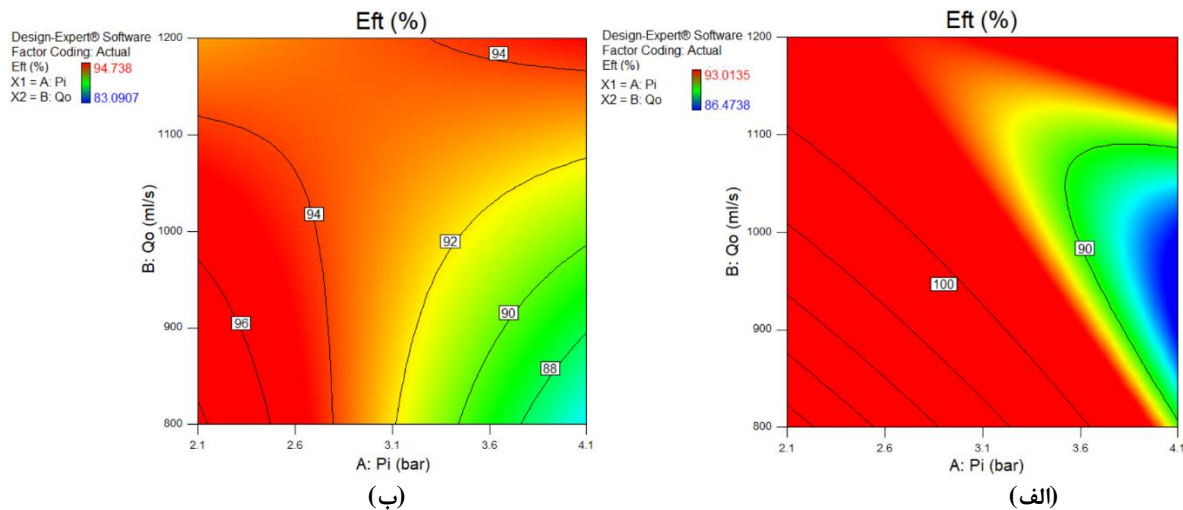
از این رابطه‌ها می‌توان برای پیش‌بینی بازده جداسازی در سطوح مورد نظری که مورد آزمون قرار نگرفته‌اند، استفاده نمود.

در شکل ۴ نمودارهای خطوط تراز بازده جداسازی کل نسبت به پارامترهای عملکردی دبی ورودی و فشار ورودی هیدروسیکلون برای پودرسنگ گرانیته و مرمیت رسم شده‌اند. در این نمودارها، بیشترین بازده جداسازی در کمترین فشار ورودی و بیشترین دبی ورودی به هیدروسیکلون رخ داده‌است که با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مطابقت دارد.

مطابق شکل ۳ در پساب گرانیته و مرمیت مورد آزمایش با غلظت وزنی ۴٪، حداکثر قطر ذرات پودرسنگ قبل از تصفیه ۵۰۰ میکرومتر بود که پس از تصفیه مرحله اول حداکثر قطر ذرات موجود در آن به ترتیب به ۵۰/۰۲ و ۲۹ میکرومتر کاهش یافت. پس از تصفیه مجدد، حداکثر قطر ذرات موجود در آن به ترتیب به ۳۷.۷۲ و ۲۴/۳۳ میکرومتر برای گرانیته و مرمیت کاهش یافت. چگالی پودرسنگ مرمیت از چگالی پودرسنگ گرانیته بیشتر است، در نتیجه طبق رابطه ۱، نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات مرمیت بیشتر از گرانیته می‌باشد، این امر موجب جدایش و ته‌نشینی بیشتر ذرات جامد و کاهش قطر آن‌ها در پساب تصفیه شده مرمیت گردید.

تحلیل نتایج آزمایش‌ها به کمک روش سطح پاسخ

رابطه ریاضی حاکم بر بازده جداسازی کل پس از دو مرحله تصفیه متوالی پساب سنگ‌بری (Ef_i) به صورت تابعی از پارامترهای هیدرولیکی شامل مجموع دبی سرریز و ته‌ریز (Q_o) و فشار ورودی (P_i) توسط نرم‌افزار (*Design Expert*)



شکل (۴): نمودارهای خطوط تراز بازده جداسازی کلی هیدروسیکلون (Eft) نسبت به پارامترهای هیدرولیکی فشار ورودی (P_i) و دبی خروجی (Q_o): (الف) گرانیب (ب) مرمیت.

نتیجه گیری

حاصل از تصفیه مرحله اول هیدروسیکلون، موجب بهبود بازده جداسازی و کاهش قطر ذرات موجود در آن شد. با تصفیه مجدد، بازده جداسازی کلی ذرات مرمیت و گرانیب از پساب به ترتیب ۲۰/۸۱ و ۲۰/۴ درصد افزایش یافت و حداکثر قطر ذرات موجود در پساب مرمیت و گرانیب پس از دو مرحله تصفیه متوالی به ترتیب ۹۵/۱۳ و ۹۴/۲ درصد کاهش یافت. اندازه ذرات موجود در پساب با اندازه ذرات موجود در سرریز مرحله اول و دوم تصفیه اختلاف معنی داری دارد اما اندازه ذرات موجود در سرریز مرحله اول تصفیه با سرریز مرحله دوم اختلاف قابل توجهی ندارند زیرا نیروی گریز از مرکز قادر به ته نشینی ذرات ریزتر نیست و این ذرات همواره با جریانات داخلی از سرریز خارج می شوند. با تغییر فشار ورودی هیدروسیکلون ها که به کمک شیرآلات و به صورت دستی صورت می گیرد به راحتی و بدون هزینه اضافی می توان بازده تصفیه را به میزان قابل توجهی افزایش داد. با تصفیه مجدد سرریز مرحله اول تصفیه، بدون اضافه کردن هیدروسیکلون دوم، پمپ و سایر تجهیزات مورد نیاز به سامانه، می توان بازده تصفیه را به میزان قابل توجهی افزایش داد. با توجه به مستقر بودن اکثر واحدهای صنعتی سنگبری در مناطق خشک و کم آب ایران و بهای بالای تأمین آب در این مناطق، استفاده از این نتایج در صنعت سنگبری توصیه می گردد. همچنین

با توجه به اهمیت مسأله بازچرخانی پساب صنعت سنگبری و مطرح شدن استفاده از هیدروسیکلون به عنوان یک روش اقتصادی برای تصفیه پساب این واحدهای صنعتی، در تحقیق حاضر مطالعه و بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازده عملکرد هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس در این تحقیق اثر عوامل عملکردی نظیر فشار ورودی و دبی ورودی هیدروسیکلون و تأثیر تصفیه مجدد پساب بر عملکرد آن در تصفیه پساب سنگبری گرانیب و مرمیت بررسی شد و نتایج نشان داد در یک غلظت وزنی و نسبت تقسیم جریان ثابت، بازده جداسازی ذرات و تصفیه پساب با فشار ورودی هیدروسیکلون نسبت معکوس دارد. کاهش دبی ورودی هیدروسیکلون و افزایش فشار ورودی آن، به علت کاهش جریان خروجی و افزایش اغتشاشات جریان داخل هیدروسیکلون و در نتیجه کاهش سرعت چرخشی سیال، بازده جداسازی را کاهش داد، به طوری که کاهش فشار ورودی به میزان ۲ بار، در مرحله اول تصفیه پساب گرانیب و مرمیت بازده جداسازی ذرات را به ترتیب ۱۱/۱۹ و ۱۵/۰۷ درصد افزایش داد و این مقدار کاهش فشار ورودی در مرحله دوم تصفیه، بازده جداسازی ذرات گرانیب و مرمیت را به ترتیب ۶/۸۴ و ۱۲/۲۳ درصد افزایش داد. تصفیه مجدد سرریز

قدردانی

نویسندگان پژوهش از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران به خاطر حمایت‌هایی که در انجام این پژوهش انجام داده‌اند قدردانی می‌کنند. این پژوهش استخراج شده از پایان‌نامه دکتری بود

مقایسه روش تصفیه به وسیله شبکه سری دوتایی هیدروسیکلون با روش تصفیه دو مرحله متوالی با یک هیدروسیکلون از نظر اقتصادی و مصرف انرژی، جهت ادامه کار این مطالعه پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- جمشیدی‌فرد، س. شیروانی، م و کثیری بیدهندی، ن. ۱۳۹۷. مطالعه تجربی و عددی عوامل موثر بر عملکرد تغلیظ کننده غبار ماریچ یک کاناله در جداسازی پودر سیاه خطوط انتقال گاز، ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹، شماره ۵، ص ۱۱۷۶-۱۱۶۷، تهران، ایران.
- نادری، الف. سیفی مزرعه نو، م. مسعودیان، م و حبیبیان، م. ۱۳۹۷. جداسازی ذرات ریز ناشی از برش سنگ گرانیت در پساب سنگ‌بری، توسط هیدروسیکلون، شانزدهمین کنگره مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران.
- نادری، الف. مسعودیان، م و حبیبیان، م. ۱۳۹۸ الف. بازیافت و استفاده مجدد پساب کارخانه‌های سنگ‌بری به روش هیدروسیکلون، راهکاری اقتصادی برای کاهش مصرف آب، مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۳، ص ۱۵۳-۱۴۷، ایران.
- نادری، الف. مسعودیان، م و حبیبیان، م. ۱۳۹۸ ب. ارزیابی و کاربرد هیدروسیکلون در جداسازی ذرات جامد سنگ از پساب صنعت سنگبری، چهارمین کنگره ملی مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی، ایران.

Dhakal, R., Aryal, B., Gurung, P., Pradhan, S. S., Shrestha, R. & Kapali, A. 2021. Design, Fabrication and Testing Of Hydrocyclone Separator as Sediment Separation System. KECCConference2019, Kantipur Engineering College, Dhapakhel Lalitpur.

Gravel, J. C. Paulo, C. I. Petit, H. A. & Irassar, E. F. 2021. Optimal design of cyclones in series for the separation of multicomponent mixtures of Portland cement, Journal of EPJ Web of Conferences 249, 12003, Powders and Grains, 4 pages, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124912003>.

Hwang, K.J., Lyu, S.Y. & Nagase, Y. 2009. Particle separation efficiency in two 10-mm hydrocyclones in series. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 40(3), 333-319. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.08.006>.

Liu, P., Fu, W., Jiang, L., Zhang, Y., Li, X., Yang, X. & Chen, B. 2022. Effect of back pressure on the separation performance of a hydrocyclone. Powder Technology, 409(4), 117823. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117823>.

Liu, X., Guo, B. & Tan, X. 2017. Petroleum production engineering, Gulf Professional Publishing.

Luciano, R. D., Silva, B. L., Rosa, L. M. & Meier, H. F. 2018. Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics. Powder Technology, 325, 452-466. DOI:10.1016/j.powtec.2017.11.043



Marthinussen, S.-A., Chang, Y.-F., Balakin, B. & Hoffmann, A. C. 2014. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones. *Chemical Engineering Science*, 108, 169-175. DOI:10.1016/j.ces.2014.01.008

Ozyonar, F. & Karagozolu, B. 2012. Systematic assessment of electrocoagulation for the treatment of marble processing wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 637-646 DOI:10.1007/s13762-012-0093-z.

Ray, M. B., Luning, P. E., Hoffmann, A. C., Plomp, A. & Beumer, M. I. 1998. Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometre. *International journal of mineral processing*, 53, 39-47.

Senfter, T., Ennemoser, J., Berger, M., Mayerl, C., Kofler, T. and Pillei, M. 2023. An Empirical Investigation on the Influence of the Number of Particle Outlets and Volume Flow Rates on Separation Efficiency and Pressure Drop in a Uniflow Hydrocyclone, *Separations* 2023, 10, 169. 13 Pages, <https://doi.org/10.3390/separations10030169>.

Venkatesh, S., Sakthivel, M., Saranav, H., Saravanan, N., Rathnakumar, M. & Santhosh, K. 2020. Performance investigation of the combined series and parallel arrangement cyclone separator using experimental and CFD approach. *Powder Technology*, 361, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.087>.

Zhang, C., Cui, B., Wei, D., Zhao, Q., Luo, N. & Feng, Y. 2017. Predicting the optimum range of feed flow rate in a hydrocyclone using the method combined flow pattern and equation model. *Powder Technology*, 319, 279-288.